
Modèles prédictifs de l'affaissement du béton : Cas de granulats concassés et roulés

Mokrane BALA¹, Rachid ZENTAR¹, Pascal BOUSTINGORRY²

¹Institut Mines Telecom Lille-Douai, LGCgE-GCE, 764 bd Lahure, BP 10838, 59508 Douai, France.
mokrane.bala@imt-lille-douai.fr

²CHRYSO France, 7 rue de l'Europe - Z.I. - 45300 Sermaises du Loiret, France.
pascal.boustingorry@chryso.com

RÉSUMÉ. La prédiction du comportement rhéologique des bétons est dans le centre des préoccupations actuelles de l'industrie du béton. Les ressources en matériaux de plus en plus rares et de propriétés très variables nous poussent à concevoir un modèle qui prend en considération ces variations afin d'économiser le temps et le coût des études de formulation de béton ainsi qu'optimiser ses performances. Des études antérieures de suspensions ont montré que les propriétés rhéologiques de ces dernières, notamment la viscosité et la contrainte seuil de cisaillement, dépendent non seulement de celles du fluide suspendant mais aussi des propriétés de l'empilement des grains solides notamment un paramètre adimensionnel intrinsèque qui suit une loi de Krieger-Dougherty. Dans cette étude, nous allons mettre en évidence les différentes propriétés du squelette granulaire qui affectent les propriétés rhéologiques du béton. Notre objectif est d'identifier le paramètre intrinsèque des granulats qui permet de calculer la contrainte seuil du béton à travers une loi modifiée de Chateau et al. Le travail est engagé sur deux typologies de grains : les granulats concassés et les roulés.

ABSTRACT. The prediction of the rheological behaviour of concretes is at the centre of current concerns of the concrete industry for different reasons. The shortage of good quality standard materials combined with variable properties of available materials imposes to improve existing models to take into account these variations at the design stage of concrete. The main reasons for improving the predictive models are, of course, saving time and cost at the design stage as well as to optimize concrete performances. Previous studies of suspensions have shown that the rheological properties of concentrated fluid, especially their viscosity and their yield stress, depends not only on rheological properties of the suspending fluid but also on the properties of the granular packing through a dimensionless parameter following Kreiger-Dougherty law. In this study, we will highlight the different properties of the granular mixture that affect the rheological properties of concrete. Our objective is to identify the intrinsic parameter of the aggregates which makes it possible to calculate the yield stress of concrete through a modified law of Chateau et al. The work will be undertaken on two typologies of grains: crushed and rolled aggregates.

MOTS-CLÉS: Contrainte seuil du béton, viscosité intrinsèque, affaissement, compacité, granulats concassés, granulats roulés.

KEY WORDS: Yield stress of concrete, intrinsic viscosity, slump, packing density, crushed aggregates, rolled aggregates.

1. Introduction

Le béton hydraulique est une association d'une phase solide constituée d'un mélange de granulats (dont la taille peut aller de quelques millimètres à quelques centimètres) et d'une phase liquide qui est la pâte de ciment (constituée d'un mélange d'eau, de liant hydraulique, adjuvants, ultrafines,...). La pâte de ciment permet d'enrober les granulats afin d'assurer une bonne maniabilité à court terme (facilite la mise en place) ainsi qu'une certaine résistance à long terme (passage de l'état liquide à l'état solide de la pâte de ciment).

Plusieurs études rhéologiques du béton ont montré que le comportement du béton à court terme est généralement considéré comme celui d'un fluide à seuil [Tattersall and Banfill 1983; Hu and de Larrard 1996]. Il suit souvent la loi de comportement de Bingham [Tattersall and Banfill 1983; Hu and de Larrard 1996]. Ce comportement est influé non seulement par la quantité et la qualité de la pâte de ciment qui s'introduit dans les vides inter-granulaires du squelette granulaire mais aussi des propriétés de ce dernier.

Dans la littérature, les études de suspensions de tailles diverses plongées dans un fluide suspensandant ont montré que le seuil de cisaillement de ce fluide dépend principalement de la compacité des particules solides, de leur fraction volumique, de leur taille et forme ainsi que du seuil de cisaillement du fluide suspensandant [Flatt and Bowen 2006; Chateau et al. 2008a; Roussel 2008; Lee et al. 2018]. Tout d'abord, la loi de Einstein (1906) (Equation 1) et les travaux de Krieger et Dougherty [Krieger and Dougherty 1959] (Equation 2) ont permis de lier la viscosité de suspensions non concentrées plongées dans un fluide suspensandant à la densité maximale des suspensions (leur compacité) ainsi qu'à une grandeur intrinsèque contrôlée par la morphologie des suspensions qui est la viscosité réduite.

$$\eta/\eta_0 = 1 + [\eta] \times \phi \quad [1]$$

$$\eta/\eta_0 = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_{max}}\right)^{-[\eta] \times \phi_{max}} \quad [2]$$

Avec : η : Viscosité dynamique des grains solides dans le fluide suspensandant en [Pa.s] ;

η_0 : Viscosité dynamique du fluide suspensandant en [Pa.s] ;

$[\eta]$: Viscosité réduite (intrinsèque) pour des grains solides de forme quelconque (égal 2,5 pour une sphère) ;

ϕ : Fraction volumique des grains solides ;

ϕ_{max} : Compacité maximale des grains solides.

L'étude de l'écoulement de grains hydrophiles parfaitement sphériques (billes de verre) plongées dans un milieu visqueux a permis par la suite de mettre en place un modèle de calcul des contraintes de cisaillement d'un fluide à seuil [Roussel 2008]. Chateau et al. [Chateau et al. 2008b] ont proposé une loi de calcul du seuil de cisaillement dans le cas des sphères (Equation 3). Cependant, les résultats de ces études n'ont pas pu être extrapolés dans le cas des bétons parce que les grains sont souvent de forme aléatoire.

$$\tau(\phi)/\tau_0 = \frac{\sqrt{1-\phi}}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_{max}}\right)^{1.25 \times \phi_{max}}} \quad [3]$$

Avec : $\tau(\phi)$: Contrainte seuil de cisaillement du béton en [Pa] ;

τ_0 : Seuil de cisaillement du fluide interstitiel (la pâte de ciment).

Dans la présente étude, nous allons introduire le facteur de morphologie des granulats sur le modèle de base de Chateau et al. Ce facteur est pris en compte à travers la viscosité réduite du modèle de Krieger et Dougherty [Krieger and Dougherty 1959]. Notre objectif de proposer un modèle prédictif du seuil de cisaillement du béton pour les granulats concassés et les granulats roulés.

2. Méthodes, matériel et matériaux

Dans le Tableau 1 sont répertoriés les granulats de la présente étude et certaines de leurs caractéristiques. La taille, la forme et la rugosité des grains sont les trois paramètres principaux qui affectent les caractéristiques rhéologiques du béton et qui ont influencé notre choix. Les granulats alluvionnaires roulés sont en provenance de Chevrières (région Hauts-de-France) et de Decize (région Bourgogne-Franche-Comté). Les granulats concassés sont en provenance des carrières du Boulonnais (Nord Pas-de-Calais). Les fractions granulaires adoptées pour cette étude s'étalent d'un sable 0/4 à un gravier 10/20.

Tableau 1. *Origine et nature des granulats étudiées*

Type de granulats	Provenance	Classe granulaire d/D	Masse volumique réelle [t/m ³]
Roulés	Chevrières	Sable 0/4	2,55
		Gravier 4/10	2,43
	Decize	Gravier 10/20	2,54
Concassés	Boulonnais	Sable 0/4	2,69
		Gravier 4/10	2,67
		Gravier 10/20	2,67

Afin de mesurer la compacité des mélanges granulaires, le mode opératoire LPC N°61 a été suivi [LEDEE et al. 2004]. Il consiste à appliquer des chocs successifs à un mélange granulaire placé dans un cylindre (table à secousses) lui permettant ainsi de se réarranger dans une configuration plus dense.

En ce qui concerne la pâte de ciment, nous avons utilisé un ciment de type CEM I 52,5 R en provenance de Saint-Pierre-La-Cour (LafargeHolcim Ciments) [NORME, NF EN 197-1. 2004]. Afin de diminuer la demande en eau du ciment, nous avons introduit dans la pâte de ciment un superplastifiant haut réducteur d'eau CHRYSO®Fluid Optima 206. Il est conforme à la norme NF EN 934-2 [NORME NF 934-2, 2012] et contient 20.3% d'extrait sec de polymères Polycarboxylates de nouvelle génération, incorporé de préférence dans l'eau de gâchage.

Pour la mesure des caractéristiques rhéologiques, nous avons utilisé le rhéomètre ANTON PAAR MCR102. Les réglages effectués avant de démarrer les essais concernent essentiellement la température de l'essai (20 °C) et l'ajustement de l'inertie du moteur. Durant cette étude, nous avons utilisé la géométrie cylindrique (couette).

Le programme expérimental élaboré vise à déterminer le seuil d'écoulement du béton à travers les modèles rhéologiques présentés précédemment et des essais d'affaissement au cône d'Abrams conformément à la norme NF 12350-2 [NORME NF 12350-2. 2012]. Pour chaque type de granulats (concassés et roulés), nous fixons la qualité de la pâte de ciment (rapport E/C et dosage en superplastifiant) et nous varions le volume de pâte à différents niveaux. Cela nous permet de déterminer l'évolution du seuil de cisaillement en fonction de la fraction volumique en solide et d'estimer les paramètres de morphologie et de compacité maximale des granulats. Les proportions volumiques de sable 0/4, de gravier 4/10 et de gros gravillons 10/20 sont fixées à 40% - 20% - 40% du volume total des granulats respectivement, soit des rapports $G/S=1,5$ et $G_2/G_1=2$.

Par ailleurs, nous avons mis en place une méthodologie de formulation de béton qui nous permet de contrôler les paramètres des différents modèles rhéologiques exploités. Cette méthodologie consiste à fixer les proportions de la phase liquide (pâte de ciment) et solide (mélange granulaire) avant de déterminer la composition de chacune de ces phases. La Figure 1 montre les différentes étapes de formulation de béton.

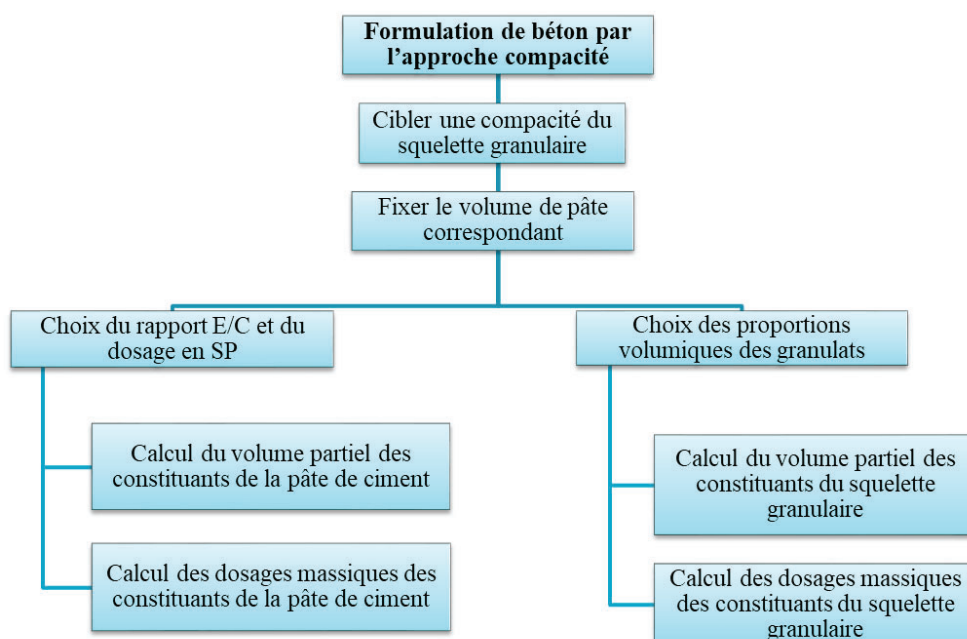


Figure 1. *Élaboration de la méthode de formulation par l'approche compacité.*

3. Résultats et discussions

Dans cette partie nous présentons et discutons tout d'abord les résultats de la caractérisation des matériaux de l'étude. Les principales propriétés des granulats de l'étude sont répertoriées dans le Tableau 2. La masse volumique absolue a été mesurée selon la norme européenne NF EN 1097-6 et l'analyse granulométrique a été effectuée suivant la norme européenne NF EN 933-1. Les courbes granulométriques sont données dans la Figure 2.

Tableau 2. *Principales caractéristiques des granulats de l'étude*

Nature des granulats	Granulats calcaires concassés			Granulats alluvionnaires roulés		
	0/4 (Sable)	4/10 (Gravier)	12/20 (Gravier)	0/4 (Sable)	4/10 (Gravier)	11/22 (Gravier)
d/D						
Teneur en fines < 63 μm [%]	6,2	1,0	0,8	1,3	1,7	0,1
d_{50} [mm]	0,7	7,2	15,2	0,4	7,0	16,0
Module de finesse (pour les sables)	3,2	-	-	3,4	-	-
M.V absolue [g/cm^3]	2,726	2,735	2,711	2,626	2,648	2,626
Absorption d'eau [%]	0,43	0,59	0,49	1,18	3,06	1,79
Forme et rugosité	Granulats anguleux de surface plane et rugueuse			Granulats de forme arrondie, plats ou allongés et de surface lisse		

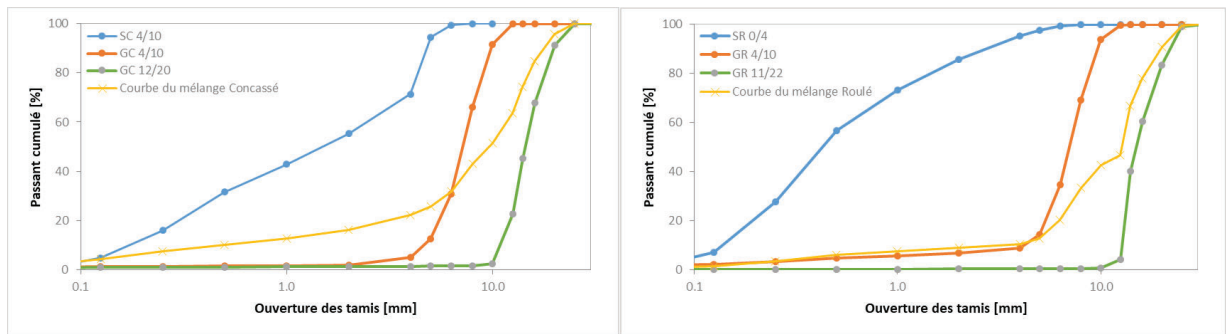


Figure 2. Courbes granulométriques des granulats concassés (à gauche) et des granulats roulés (à droite)

Les essais de mesure de la compacité ont été réalisés par la table à secousses selon le mode opératoire LPC N°61 [LEDEE et al. 2004]. Les essais sont réalisés sur les mélanges granulaires sans tamisage des granulats pour enlever la fraction fine (<63 microns) qui n'influe pas la précision des mesures de compacité [Bala et al. 2018c; Bala et al. 2018a]. La compacité mesurée des mélanges ternaires 40% S 0/4 + 20% G₁ 4/10 + 40% G₂ 10/20 s'élève à 0,719 pour les granulats concassés et 0,796 pour les granulats roulés.

Par ailleurs, la contrainte seuil de la pâte de ciment, dont le rapport E/C et le dosage en superplastifiant sont fixés à 0,5 et 0,6% respectivement, a été déterminée expérimentalement par le rhéomètre par un essai en gradient de cisaillement (descendant) contrôlé. Nous considérons que la contrainte seuil est la valeur minimale qu'atteint la contrainte de cisaillement qui permet à la pâte de ciment de rester en écoulement stable [Bala et al. 2018b]. La contrainte seuil de pâte est égale à 1,42 Pa.

Pour les bétons confectionnés, nous varions le volume de pâte (soit la fraction volumique en solide) et nous visons des classes de consistances allant de S1 à S4 au sens de la norme NF EN 206. Les résultats de mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (Figure 3) montrent que ce dernier augmente avec l'augmentation du volume de pâte. D'autre part, une compacité plus grande des granulats roulés permet d'atteindre des affaissements plus importants pour le même volume de pâte. En visant la même classe de consistance, l'amélioration de la compacité de 0,07 point conduit à un gain de pâte de ciment de 4% environ.

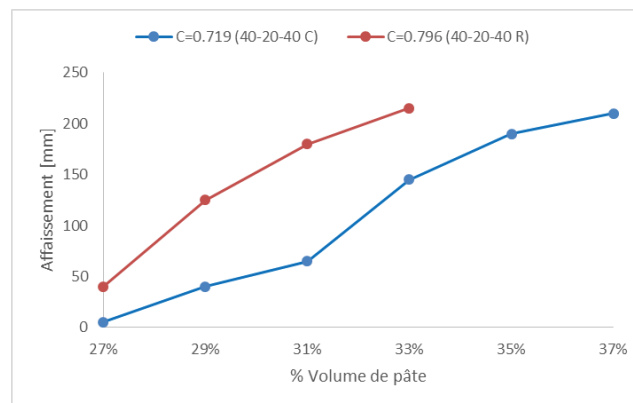


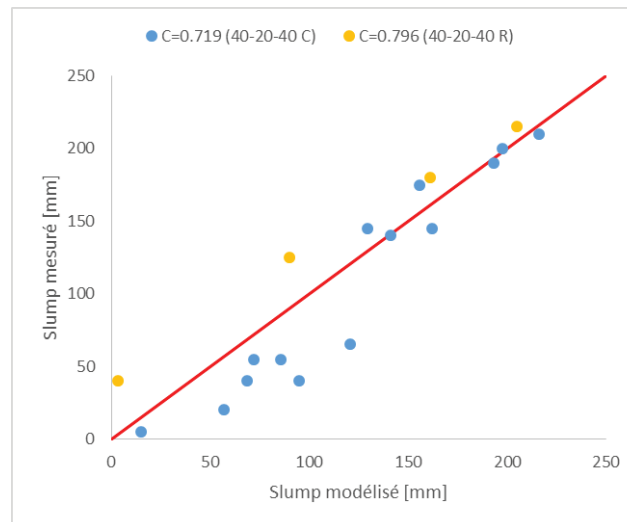
Figure 3. Evolution de l'affaissement en fonction du volume de pâte

Afin d'expliquer l'effet de la compacité et de la morphologie des granulats sur l'affaissement et le seuil de cisaillement du béton, nous allons réaliser une modélisation de ce dernier à travers le modèle de Chateau et al. (Equation 3) dans lequel nous introduisant la viscosité réduite définit dans les Equations 1 et 2. Les valeurs de la viscosité réduite et de la compacité maximale du béton sont calées sur les courbes expérimentales de l'affaissement à l'aide de l'Equation 4. Cela après avoir transformé les affaissements mesurés en contrainte seuil de cisaillement à travers le modèle de Saak et al. [Saak et al. 2004]. Les résultats de la modélisation avec les erreurs moyennes quadratiques (RMSE) sont donnés dans le Tableau 3 et la Figure 4.

$$\frac{\tau(\phi)}{\tau_0} = \frac{\sqrt{1-\phi}}{\left(1 - \frac{\phi}{\phi_{max}}\right)^{\frac{[\eta]}{2} \times \phi_{max}}} \quad [4]$$

Tableau 3. Détermination des paramètres et prédiction du modèle de Chateau et al. modifié

"C = 0,719" (40-20-40 C)		RMSE
ϕ_{max}	0.901	
$[\eta]$	10.381	
"C = 0,796" (40-20-40 R)		27,6 mm
ϕ_{max}	0.793	
$[\eta]$	7.883	

**Figure 4.** Affaissements mesurés vs. modélisés

D'après les résultats de la modélisation, nous remarquons que la l'introduction de la pâte de ciment fait augmenter la compacité du béton. Elle est plus importante dans le cas des granulats concassés. Pour les granulats roulés, la compacité maximale n'a pas changé avec l'introduction de la pâte de ciment. L'optimisation du modèle sur deux paramètres peut être la cause de certains écarts dans la détermination de ces paramètres.

Pour la viscosité réduite $[\eta]$, nous remarquons qu'elle est influée par la morphologie des granulats. Sa valeur est plus petite pour les granulats roulés ce qui est expliqué par le fait que les granulats roulés se rapproche plus de la sphère (pour laquelle $[\eta] = 2,5$) en comparaison avec les granulats concassés.

Enfin, nous constatons que les plus grands écarts entre les affaissements mesurés et modélisés sont notés dans la zone des bétons peu plastiques. Cela indique que le modèle est plus adapté aux bétons de classe S3 à S4.

4. Conclusion

L'étude expérimentale menée sur l'affaissement du béton et les modélisations réalisées dans le cas de granulats concassés et roulés permettent de dire que :

- L'écoulement du béton à travers l'essai d'affaissement au cône d'Abrams nécessite un volume minimal de pâte (qualité de pâte et compacité des granulats étant fixes). Ce volume minimal peut être réduit en améliorant la compacité du mélange granulaire.
- La forme arrondie des granulats roulés induit une amélioration de l'affaissement. Cet effet est lié à l'amélioration de la compacité et la facilité de mouvement des grains (surface lisse et moins de frottements entre les grains).
- Il a été confirmé à travers les résultats obtenus par le modèle modifié de Château et al. que les paramètres influant le seuil de cisaillement du béton sont :
 - ✓ La forme des granulats ;
 - ✓ La compacité maximale que peut atteindre le béton.

Comme perspectives à la présente étude, nous développons des programmes d'intelligence artificielle pour prédire l'affaissement du béton à partir de la base de données que nous avons pu développer lors de la présente étude.

Remerciements

Les auteurs remercient le département R & D de CHRYSO France pour son soutien technique et financier à ces travaux de recherche.

Bibliographie

BALA, M., ZENTAR, R., AND BOUSTINGORRY, P. 2018a. Etude d'impact de la forme des granulats sur les paramètres du modèle d'empilement compressible. *36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC. Saint-Etienne, France.* 1–4.

BALA, M., ZENTAR, R., AND BOUSTINGORRY, P. 2018b. Détermination des contraintes seuil des pâtes de ciment en vue d'une optimisation de la rhéologie des bétons. *19ème Edition des Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)2B. Anglet, France.* 1–10.

BALA, M., ZENTAR, R., AND BOUSTINGORRY, P. 2018c. Parameter analysis of the compressible packing model for Concrete application. *12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Prague, Czech Republic.* 1–8.

CHATEAU, X., OVARLEZ, G., AND TRUNG, K.L. 2008a. Homogenization approach to the behavior of suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids. *Journal of Rheology* 52, 2, 489–506.

CHATEAU, X., OVARLEZ, G., AND TRUNG, K.L. 2008b. Homogenization approach to the behavior of suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids. *Journal of Rheology* 52, 2, 489.

FLATT, R.J. AND BOWEN, P. 2006. Yodel: a yield stress model for suspensions. *Journal of the American Ceramic Society* 89, 4, 1244–1256.

HU, C. AND DE LARRARD, F. 1996. The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and concrete research* 26, 2, 283–294.

KRIEGER, I.M. AND DOUGHERTY, T.J. 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of the Society of Rheology* 3, 1, 137–152.

LEDEE, V., DE LARRARD, F., SEDRAN, T., AND BROCHU, F. 2004. Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses: Mode opératoire. *Techniques et méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées. Méthode.*

LEE, J.H., KIM, J.H., AND YOON, J.Y. 2018. Prediction of the yield stress of concrete considering the thickness of excess paste layer. *Construction and Building Materials* 173, 411–418.

NORME NF 934-2, 2012. *Adjuvants pour béton, mortier et coulis-Partie 2.*

NORME, NF EN 197-1. 2004. *Ciment.*

NORME NF 12350-2. 2012. *Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement.*

ROUSSEL, N. 2008. *Ecoulement et mise en œuvre des bétons.* LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (LCPC).

SAAK, A.W., JENNINGS, H.M., AND SHAH, S.P. 2004. A generalized approach for the determination of yield stress by slump and slump flow. *Cement and concrete research* 34, 3, 363–371.

TATTERSALL, G.H. AND BANFILL, P.F.G. 1983. *The rheology of fresh concrete.* Pitman London.